

УДК 621.375.826

**ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ  
ПОСРЕДСТВОМ РАСЧЕТА СОЗДАВАЕМЫХ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ  
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ****канд. техн. наук С.Ф. КУКИН, А.С. КУКИН, А.А. БАРКУН****(Минский тракторный завод);****д-р техн. наук О.Г. ДЕВОЙНО****(Белорусский национальный технический университет, Минск);****д-р техн. наук, проф. В.С. ИВАШКО****(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)**

*Развиваются приближенные численные методы на базе MathCAD для расчета температурных полей, формируемых движущимся круглым пятном лазерного излучения по обрабатываемой металлической поверхности детали с распределением плотности мощности в пятне по закону Гаусса и равномерным распределением. Методы основаны на решении интегрального уравнения, описывающего распределение температуры по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  в объеме обрабатываемого материала детали при распространении поглощенного его поверхностью лазерного излучения за счет механизма теплопроводности. Предложен метод использования полученных графических распределений температуры по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  для оптимизации режимов процесса лазерного термоупрочнения. На основании соответствующих сравнений выявлены преимущества использования равномерного распределения плотности мощности по пятну в процессе лазерного термоупрочнения.*

**Введение.** Лазерное термоупрочнение внутренних контактных поверхностей корпусных деталей автотракторной техники в настоящее время является одним из наиболее перспективных методов поверхностного упрочнения, обеспечивающих особые поверхностные свойства локальных зон, не изменяя конструктивной прочности, жесткости и точности размерных характеристик всей детали в целом.

Техническое применение данной технологии требует высокой степени ее воспроизводимости. Для достижения этой цели в настоящее время применяется активный контроль как качества обработки, так и, по возможности, всего процесса. Наличие неоднородности на обрабатываемой поверхности (окисные пленки, загрязнения, следы обработки) и колебаний выходной мощности даже около 5 % достаточно, чтобы получить неоднородное качество обработки поверхности. Для уменьшения этих эффектов необходимо управлять воздействием луча на обрабатываемую поверхность с высокими временными и пространственными разрешениями [1].

Большое значение при этом придается лазерной обработке как финишной операции, не искажающей исходный микрорельеф поверхности, что возможно только при проведении процесса термоупрочнения из твердого состояния, т.е. необходимо проводить процесс лазерной обработки с температурой в пятне, не превышающей температуру плавления обрабатываемого материала. Постоянство температуры в пятне лазерного луча на обрабатываемой поверхности возможно обеспечивать, используя деформируемые и адаптивные зеркальные системы [2]. В последнее время широкое распространение для лазерного термоупрочнения получают технологические лазерные установки на диодно-волоконных излучателях, обеспечивающих формирование на обрабатываемой поверхности требуемой геометрии пятна (круглое, эллиптическое, квадратное, прямоугольное, линейное) с равномерным распределением плотности мощности [3]. Для четкого выполнения условия – не превышать температуру плавления – необходимо точно прогнозировать требуемые значения параметров процесса обработки, которые обеспечивают необходимое распределение температур вдоль, по ширине и глубине формируемого следа лазерной обработки. В связи с этим большое значение придается математическому моделированию процесса лазерного термоупрочнения с целью получения зависимостей для быстрого и с достаточной для практики точностью расчета необходимых и оптимальных параметров процесса.

**Постановка задачи.** Существующие методы базируются на классическом уравнении теплопроводности (1) с соответствующими граничными и начальными условиями [4].

Система (1) описывает теплофизику воздействия лазерного излучения на поверхность полубесконечного тела (на практике достаточно массивная деталь) с постоянными оптическими и теплофизическими свойствами, причем потери тепла на фазовые переходы не учитываются. Здесь  $T$  – температура, К;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – пространственные координаты;  $t$  – время;  $q_0$  – плотность потока энергии, поглощенной телом;

$k$ ,  $\lambda$  и  $\alpha$  – коэффициенты сосредоточенности, теплопроводности и температуропроводности соответственно;  $T_0$  – начальная температура.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} &= \frac{1}{\delta} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{v}{\delta} \frac{\partial T}{\partial x}; \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} &= q(x, y); \\ T(\infty, y, z, t) = T(x, \infty, z, t) &= T(x, y, \infty, t) = T(x, y, z, 0) = T_0; \\ -\infty < x < +\infty; -\infty < y < +\infty; &0 \leq z < +\infty; t \geq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Для кругового пятна с гауссовым распределением (2), движущегося прямолинейно в направлении оси  $Ox$  с постоянной скоростью  $v$  (рис. 1):

$$q(x, y) = \frac{P\eta}{\pi r^2} \exp \left[ -\frac{x^2 - y^2}{r^2} \right], \quad (2)$$

решение задачи (1) имеет вид [5]:

$$T(x, y, z, t) = \frac{P\eta}{r\lambda\pi^{3/2}} \int_0^t \frac{\exp \left[ -\frac{y^2 + (x+vt)^2}{4 \left( at + \frac{r^2}{4} \right)} - \frac{z^2}{4at} \right]}{\left( at + \frac{r^2}{4} \right) \sqrt{t}} dt. \quad (3)$$

Здесь  $P$  – мощность лазерного излучения;  $\eta$  – коэффициент поглощения;  $r$  – радиус сфокусированного пятна лазерного луча на обрабатываемой поверхности.

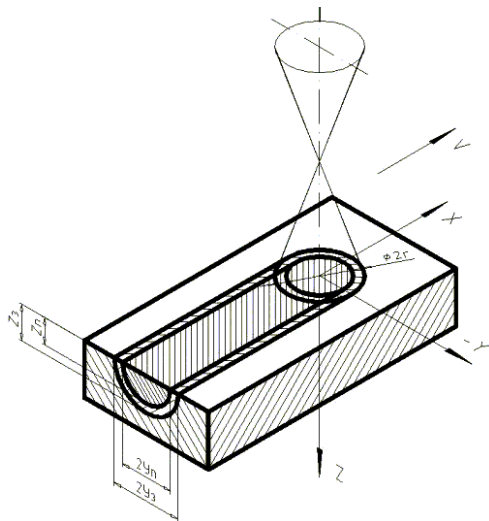


Рис. 1. Схема воздействия лазерного излучения на обрабатываемую поверхность

Решение данного интегрального уравнения дает распределение температуры по глубине обрабатываемого материала от распространяющегося теплового потока за счет теплопроводности. Размеры закаленных слоев определяются координатами соответствующих изотерм. Например, зона закалки (глубина упрочненного слоя по центру пятна  $Z_3$  и ширина –  $2Y_3$ ) характеризуется изотермой закалки  $T_{зак}$  (для чугуна  $T_{зак} = 900$  °С), а зона плавления (глубина проплавления по центру пятна  $Z_{пл}$  и ширина проплавленного слоя  $2Y_{пл}$ ) – изотермой плавления  $T_{пл}$  (для чугуна  $T_{пл} = 1140$  °С).

**Решение задачи численными методами на базе MathCAD.** Уравнение (3) интегрируется отдельно по координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$  с помощью встроенных в MathCAD функций интегрирования для текущего значения  $t$ .

Зависимости для расчета распределения температуры по координатам  $x$ ,  $y$  и  $z$  представлены следующими выражениями [5]:

$$T(x) = \frac{P\eta \int_0^t \frac{\exp \left[ -\frac{(x+vt)^2}{4 \left( at + \frac{r^2}{4} \right)} \right]}{\left( at + \frac{r^2}{4} \right) \sqrt{t}} dt}{r\lambda\pi^{3/2}}; \quad (4)$$

$$T(y) = \frac{P\eta \int_0^t \frac{\exp\left[\frac{-y^2 - v^2 t^2}{4\left(at + \frac{r^2}{4}\right)}\right]}{\left(at + \frac{r^2}{4}\right)} dt}{r\lambda\pi^{3/2}}; \quad (5)$$

$$T(z) = \frac{P\eta \int_0^t \frac{\exp\left[\frac{-z^2}{4at} + \frac{-(vt)^2}{4\left(at + \frac{r^2}{4}\right)}\right]}{\left(at + \frac{r^2}{4}\right)\sqrt{t}} dt}{r\lambda\pi^{3/2}}. \quad (6)$$

Согласно схеме лазерной обработки, представленной на рисунке 1, ширина закаленной зоны описывается координатой  $Y$ , глубина – координатой  $Z$ , а координата  $X$  определяет направление движения пятна лазерного луча со скоростью  $v$  по обрабатываемой поверхности. В зависимости от величины этой скорости зависит и время взаимодействия движущегося пятна с поверхностью детали.

В выражениях (4)...(6)  $P\eta/(\pi^{3/2}r)$  – плотность мощности кругового источника с гауссовым распределением.

Для равномерного распределения плотности мощности в круговом пятне лазерного излучения уравнение для плотности мощности описывается выражением  $P\eta/(\pi r^2)$  [6] и его необходимо ввести в соответствующие зависимости (4)...(6) для расчета распределения температуры по координатам  $x, y, z$ .

Структура вычислительного блока интегрирования выражения (4) в среде MathCAD следующая:

- задание значений входных параметров процесса ( $r, v, P$ ) и констант ( $a, \lambda, \eta$ );
- задание выражения для расчета времени ( $t$ ) взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемой в поверхность в цикле нагрева ( $t = 2r/v$ );
- задание диапазона изменения координаты ( $x, y, z$ ) через фиксированный шаг;
- задание формул для вычисления температуры по координатам, выражения (4)...(6);
- вывод результатов интегрирования;
- построение графической зависимости изменения температуры по координатам ( $x, y, z$ ).

Для лазерного термоупрочнения как финишной операции необходимо вести процесс обработки без оплавления поверхности, т.е. необходимо подбирать такие параметры процесса, чтобы температура в центре пятна была ниже температуры плавления обрабатываемого материала.

По графической зависимости распределения температуры по глубине и ширине зоны упрочнения можно определить размеры упрочненной зоны и таким образом оценить преимущества равномерного распределения энергии лазерного излучения по сравнению с гауссовым.

Вычислялись распределения температуры для круглого пятна с гауссовым и равномерным распределением по выражениям (4)...(6) при одинаковых значениях таких параметров лазерной обработки, как материал – чугун СЧ-20;  $r = 1,6$  мм;  $a = 13$  мм<sup>2</sup>/с;  $\lambda = 0,05$  Вт/мм·град;  $P = 1000$  Вт;  $\eta = 0,75$ . Изменялась только скорость обработки  $v$  из условия получения одинаковой температуры в центре пятна, которая для СЧ-20 должна быть не более 1150 °С, чтобы не происходило оплавление поверхности.

Графическое изображение распределения температур по осям  $x, y, z$  для кругового пятна лазерного излучения с гауссовым и равномерным распределением плотности мощности представлено на рисунке 2. Из графиков видно, что при всех прочих равных условиях применение равномерного распределения плотности мощности по пятну в среднем дает увеличение скорости обработки в 1,5 раза.

Предлагаемая математическая модель расчета температурных полей удобна с практической точки зрения для прогнозирования, отработки и оптимизации режимов лазерного термоупрочнения, а также оценки получаемых размеров упрочненных слоев.

Изменяя значения входных параметров процесса можно добиться соответствующего распределения температуры в зоне упрочнения и получить оптимальную глубину и ширину упрочнения при минимальных затратах на отработку режимов процесса термоупрочнения.

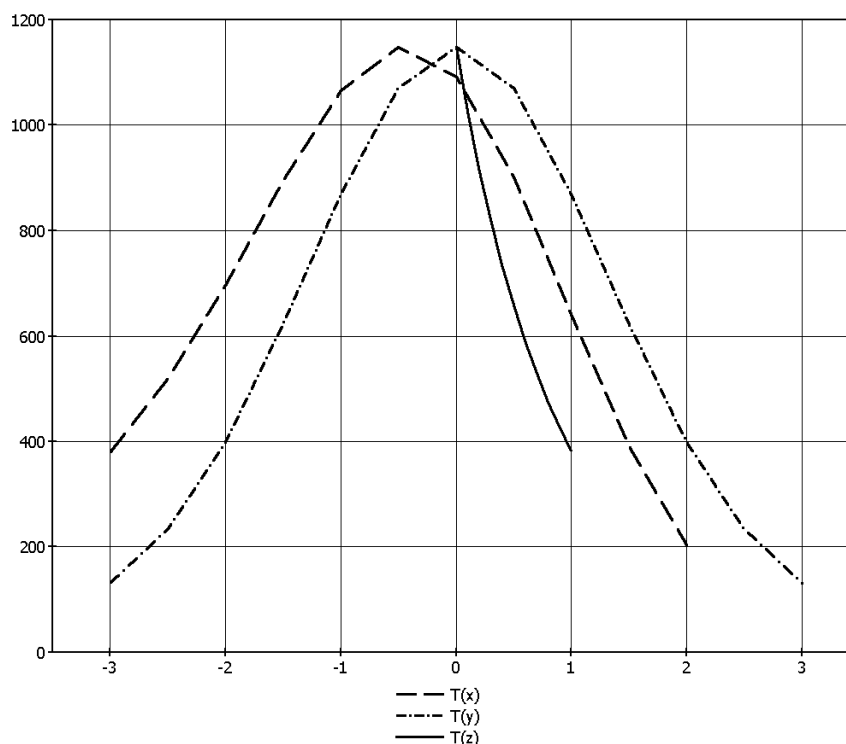


Рис. 2. Распределение температуры  $T$  по осям  $x, y, z$  для пятна с гауссовым распределением ( $v = 20$  мм/с) и равномерным распределением ( $v = 30$  мм/с)

### Выводы

Использование метода решения интегральных уравнений на базе MathCAD позволяет быстро и достаточно точно с практической точки зрения производить расчеты тепловых полей при лазерном термоупрочнении деталей из железоуглеродистых сплавов. Данный метод также удобен для расчета и оптимизации режимов лазерного термоупрочнения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Laser integrated processing – first applications in industry / Th. Rudlaff [et al.] // Laser Treatment of Materials. ECLAT'96: Proc. Int. Conf. / eds. F. Duasinger, H.W. Bergmann, J. Sigel / AWT e.V. 2 Vol. – Vol. 2. – P. 779 – 778.
2. McEntee, J. Adaptive mirrors give sharper image / J. McEntee // Opto & Laser Europe. – 1995. – № 26. – P. 27.
3. Hoffmann, P. Recent Developments of System Technology for Surface Treatment / P. Hoffmann, R.R. Dierken // Proceedings of the 5<sup>th</sup> LANE 2007, Eriangen, September 25 – 28, 2007. – P. 715 – 728.
4. Углов, А.А. К расчету температурных полей от движущихся концентрированных источников энергии / А.А. Углов, И.Ю. Смуров, С.С. Андрианов // Физика и химия обработки материалов. – 1983. – № 1. – С. 35 – 43.
5. Кукин, С.Ф. Особенности расчета тепловых полей при лазерно-ультразвуковой обработке металлических поверхностей / С.Ф. Кукин, А.А. Баркун // Теория и практика машиностроения. – 2005. – № 2. – С. 24 – 26.
6. Григорьянц, А.Г. Основы лазерного термоупрочнения сплавов / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов. – М.: Высшая школа, 1988. – 159 с.

Поступила 18.02.2008